

现代 大地测量学的 理论及其应用

胡明城 著

The Theory and the Application Of Contemporary Geodesy

测绘出版社

现代大地测量学的 理论及其应用

胡明城 著

测绘出版社

· 北京 ·

内 容 提 要

由于空间大地测量的崛起,大地测量学发生了巨大变革,出现了崭新的大地测量理论和方法。传统大地测量方法绝大部分为新方法所取代,经典大地测量理论因赋予了新的内容而发扬光大,大地测量应用领域大大扩展。为了以有限篇幅包容大地测量的最新发展,对于已被取代的传统大地测量,本书只作概述;对于现在仍有价值的理论,则采取压缩方式,即简明扼要,但无损于内容。本书着重于新理论和新方法以及新应用领域的介绍,特别是大地测量在解决目前人类面临的自然灾害频繁、生态环境退化和矿产资源日益枯竭三大问题中所能起到的作用。

图书在版编目(CIP)数据

现代大地测量学的理论及其应用/胡明城著. —北京:
测绘出版社, 2003. 10
ISBN 7-5030-1205-6

I. 现... II. 胡... III. 大地测量学 IV. P22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 091315 号

测绘出版社出版发行

(100054 北京宣武区白纸坊西街3号)

通州区次渠印刷厂印刷·新华书店经销

2003年10月第1版·2003年10月第1次印刷

开本:850×1168 1/32·印张:15.25

字数:395千字·印数:0001—4000册

定价:32.00元

前 言

从 20 世纪 60 年代初开始,空间大地测量的崛起,使大地测量学理论和观测技术发生了巨变。另一方面,1967—1968 年板块大地构造学说的提出,是人们对地球的认识的一个飞跃,从而引起地球科学的巨变。在这样的形势下,大地测量学冲破了过去局限性,由区域性大地测量发展为包括海洋的全球性大地测量;由研究地球表面发展为涉及地球内部;由静态大地测量发展为动力大地测量;由测地发展为测月和太阳系各行星。面对大地测量学如此丰富的内涵,著者深感有必要对它作全面而系统的论述,以反映当代大地测量的发展水平,于是与鲁福先生协作,历时 10 年写成《现代大地测量学》,上、下册分别于 1993 年和 1995 年出版。

自接受本书的撰写任务后,为了以有限篇幅包容大地测量学最新成就,著者以上述著作为基础,参阅了直到 2002 年 8 月的中外大地测量有关文献,力求使此书取材新颖,贴近现代。

本书第 4 章 4.8 节“测量平差法和误差理论的创新”特请对这些问题有深入研究的欧吉坤先生撰写。笔者在此谨致谢忱。

作 者

2003 年 5 月

目 录

第 1 章 大地测量学的起源和发展	(1)
1.1 导 言	(1)
1.2 萌芽阶段的大地测量	(2)
1.3 大地测量学科的形成	(5)
1.3.1 概述	(5)
1.3.2 观测工具的发展	(6)
1.3.3 数学对大地测量学的促进作用.....	(11)
第 2 章 几何大地测量学	(15)
2.1 绪 论.....	(15)
2.2 大地天文学.....	(19)
2.3 大地基准的建立.....	(21)
2.4 建立国家大地控制网的基本原则.....	(24)
2.5 水平角观测.....	(27)
2.6 电磁波测距.....	(30)
2.7 水准测量.....	(35)
2.8 三角高程测量.....	(43)
2.9 大地基准参数的求定.....	(50)
2.10 测定大地水准面的天文水准法	(51)
2.11 测定大地水准面的天文重力水准法	(53)
第 3 章 物理大地测量学	(55)
3.1 绪 论.....	(55)
3.2 位理论基础.....	(60)
3.2.1 引力和引力位.....	(60)
3.2.2 质体位.....	(62)

3.2.3	单层位和双层位	(64)
3.2.4	拉普拉斯方程和布桑方程	(66)
3.2.5	格林公式	(67)
3.2.6	球谐函数	(69)
3.2.7	边值问题	(80)
3.3	地球重力场	(84)
3.3.1	重力和重力位	(84)
3.3.2	水准面和垂线	(85)
3.3.3	地球引力位的球谐函数展开式	(87)
3.3.4	大地水准面	(90)
3.3.5	斯托克斯定理	(91)
3.3.6	地球的正常重力场	(92)
3.3.7	扰动重力场	(94)
3.3.8	重力异常、垂线偏差、大地水准面高与扰动位的关系	(99)
3.3.9	球近似和 T 、 N 、 Δg 的球谐函数展开式	(101)
3.4	重力测量、重力归算和重力异常的推估	(104)
3.4.1	概述	(104)
3.4.2	绝对重力测量	(106)
3.4.3	海底绝对重力仪和深拖海洋重力仪	(108)
3.4.4	超导重力梯度仪	(109)
3.4.5	机载重力测量	(110)
3.4.6	重力参考系统	(112)
3.4.7	重力控制网	(113)
3.4.8	重力归算	(114)
3.4.9	重力异常的推估	(121)
3.5	推求地球形状及其外部重力场的理论和方法	(128)
3.5.1	概述	(128)
3.5.2	斯托克斯理论	(130)

3.5.3	维宁·曼乃兹公式	(132)
3.5.4	面积分的计算	(133)
3.5.5	莫洛坚斯基理论	(136)
3.5.6	布耶哈默尔方法	(141)
第4章 空间大地测量的崛起和现代大地测量学的形成		
		(143)
4.1	绪论	(143)
4.2	现代大地测量学的应用领域	(147)
4.2.1	概述	(147)
4.2.2	利用 GPS 的机载地球物理测量	(148)
4.2.3	星载 GPS 的科学应用	(150)
4.2.4	交相辉映的空间大地测量	(150)
4.2.5	卫星雷达测高的应用领域	(155)
4.2.6	地球重力场的应用领域	(165)
4.3	甚长基线干涉测量(VLBI)	(171)
4.3.1	概述	(171)
4.3.2	VLBI 的几何原理	(176)
4.3.3	VLBI 系统的主要部件及其功能	(179)
4.3.4	VLBI 观测的实施	(182)
4.3.5	天球参考标架和地球参考标架	(183)
4.3.6	现状和展望	(186)
4.4	月球和行星测量学	(188)
4.4.1	绪论	(188)
4.4.2	月心坐标系和月面控制网的建立	(189)
4.4.3	月球重力场和其他参数的测定	(190)
4.4.4	行星测量学	(191)
4.5	现代大地测量学	(192)
4.5.1	绪论	(192)
4.5.2	现代大地测量学的基本任务	(194)

4.5.3	现代大地测量学在地球科学中的作用	(195)
4.6	中国大地测量的成就	(200)
4.6.1	中国的天文大地网	(200)
4.6.2	中国的国家水准网	(204)
4.6.3	中国的国家重力基本网	(205)
4.6.4	中国大地基准的建立和天文大地网的平差	(208)
4.6.5	珠穆朗玛峰的高程测定	(210)
4.7	伴随大地测量事业发展的学术研究	(213)
4.8	测量平差法和误差理论的创新	(215)
4.8.1	配合国家大地测量开展的理论研究成果	(215)
4.8.2	精化测量平差法和误差理论的研究成果	(216)
4.8.3	参与国际上重要大地测量理论问题的评议	(217)
4.8.4	独创拟稳平差理论	(219)
4.8.5	发展抗差估计理论	(221)
第5章	卫星大地测量学	(225)
5.1	绪论	(225)
5.2	卫星运动理论	(227)
5.2.1	卫星的无摄运动	(227)
5.2.2	卫星的受摄运动	(233)
5.2.3	地球引力场引起的摄动	(237)
5.2.4	日月引力和地球潮汐引起的摄动	(240)
5.2.5	大气阻力引起的摄动	(242)
5.2.6	光压引起的摄动	(243)
5.2.7	解卫星运动方程的数值法	(245)
5.3	卫星大地测量的观测方法	(245)
5.3.1	概述	(245)
5.3.2	卫星大地测量几何法	(246)
5.3.3	照相观测	(248)
5.3.4	卫星激光测距(SLR)	(250)

5.3.5	卫星多普勒测量	(253)
5.3.6	美国海军导航卫星系统(NNSS)	(255)
5.3.7	全球定位系统(GPS)	(256)
5.3.8	GPS 应用于气象学	(262)
5.3.9	GPS 引起的各国大地测量的新动向	(269)
5.3.10	卫星雷达测高	(278)
5.3.11	由卫星集成的多普勒定轨和无线电定位系统 (DORIS)	(289)
5.3.12	精密距离及其变率测量系统(PRARE)	(290)
5.3.13	合成孔径雷达干涉测量(INSAR)	(290)
5.4	全球地球重力场模型	(293)
5.4.1	概述	(293)
5.4.2	GEM 重力场模型序列	(295)
5.4.3	OSU 重力场模型序列	(296)
5.4.4	TEG 重力场模型序列	(297)
5.4.5	联合重力场 JGM 模型序列	(297)
5.4.6	GRIM 重力场模型序列	(298)
5.4.7	EGM 96 全球重力场模型	(298)
第 6 章	动力大地测量学	(302)
6.1	绪 论	(302)
6.2	地球构造	(306)
6.2.1	地球内部	(306)
6.2.2	地球大气	(309)
6.2.3	地球表面的各种构造形态	(311)
6.2.4	地壳均衡学说	(313)
6.3	地球自转	(316)
6.3.1	概述	(316)
6.3.2	岁差和章动	(317)
6.3.3	地球自转的理论基础	(318)

6.3.4	影响地球自转的各种因素	(321)
6.3.5	极移	(325)
6.3.6	地球自转速度变化	(330)
6.3.7	地球自转参数的测定	(333)
6.4	固体潮	(337)
6.4.1	概述	(337)
6.4.2	平衡潮理论	(339)
6.4.3	引潮力位	(340)
6.4.4	洛夫数	(341)
6.4.5	固体潮特征数及其观测	(342)
6.4.6	固体潮观测的干扰因素	(343)
6.4.7	数据处理	(343)
6.5	板块大地构造学说	(344)
6.5.1	概述	(344)
6.5.2	板块构造运动	(348)
6.5.3	全球板块分布模型	(350)
6.5.4	全球板块运动模型	(357)
6.6	地壳运动的监测	(362)
6.6.1	概述	(362)
6.6.2	由空间大地测量所得的现代板块运动	(365)
6.6.3	地壳形变的监测	(366)
6.6.4	GPS 用于地壳形变监测	(368)
6.6.5	常设 GPS 大地测量阵列	(370)
6.6.6	陆地表层沉降的监测	(373)
6.6.7	地壳应变分析	(374)
6.6.8	现代地壳垂直运动的测定	(383)
第 7 章 海洋大地测量学		(385)
7.1	绪论	(385)
7.2	海洋环境	(389)

7.2.1	海洋自然环境	(389)
7.2.2	声波在海水中的传播	(391)
7.2.3	潮汐	(392)
7.3	定位和导航	(397)
7.3.1	概述	(397)
7.3.2	RBN/DGPS 助航系统	(398)
7.3.3	船位推算导航系统	(399)
7.3.4	声定位和导航系统	(401)
7.4	海底大地控制网	(404)
7.4.1	概述	(404)
7.4.2	利用 GPS 建立海底大地控制网	(406)
7.4.3	海洋上的划界	(410)
7.5	海道测量	(411)
7.5.1	概述	(411)
7.5.2	声纳系统	(413)
7.5.3	测深	(418)
7.5.4	海底特征调查	(421)
7.5.5	海道测量在其他方面的应用	(424)
7.6	海洋地球物理测量和矿产资源开发	(426)
7.6.1	概述	(426)
7.6.2	海洋重力测量	(427)
7.6.3	海洋测磁	(430)
7.6.4	地震测量	(432)
7.6.5	地质方法	(437)
7.6.6	海洋大地测量用于矿业资源开发	(439)
7.6.7	新能源甲烷水合物的发现及其开发前景	(445)
第 8 章	面向减灾和环境监测的大地测量	(447)
8.1	绪论	(447)
8.2	火山活动及其监测	(450)

8.2.1	概述	(450)
8.2.2	大地测量用于地震和火山活动监测	(450)
8.2.3	20世纪90年代的火山喷发	(453)
8.2.4	火山喷发与航行安全	(456)
8.2.5	减轻火山灾害的展望	(457)
8.3	海啸	(458)
8.3.1	海啸的成因	(458)
8.3.2	海啸造成的灾难	(459)
8.3.3	海啸的减灾措施	(460)
8.4	全球海面长期上升趋势	(461)
8.4.1	概述	(462)
8.4.2	全球海面上升量的估计	(463)
8.4.3	全球海面变化的监测	(464)
8.5	厄尔尼诺现象	(467)
8.5.1	概述	(467)
8.5.2	大地测量在监测厄尔尼诺中的作用	(468)
8.5.3	厄尔尼诺的预测	(470)
外文缩写词表		(473)
参考文献		(476)

第 1 章 大地测量学的起源和发展

1.1 导 言

大地测量这一术语来源已久。古时人们为了进行狩猎和耕种活动,需要划分土地,分配给共同生活的成员,于是希腊语中出现了 $\gamma\eta\delta\alpha'lw$ ($\gamma\eta$ = 地球, $\delta\alpha'lw$ = 我划分)这个词;按其意义,最初是指划界和地籍测量这一类的工作,相当于现在的普通测量。后来在英语和法语中,这一术语的含义有了扩充,用于指大地测量学,如英语的 Geodesy 和法语的 Géodésie;而在德语和俄语中,则于这一术语前加一形容词“高等”,用来指大地测量学,以区别于普通测量学,如德语的 Höhere Geodäsie 和俄语的 Высшая Геодезия。

德国的赫尔默特(F. R. Helmert)于 1880 年提出了大地测量学的经典定义:大地测量学是测绘地球表面的科学。直到现在,这一定义尚未失去它的准确性,它包括测定地球外部重力场和测绘海底表面,说明大地测量学属于地球科学。

空间大地测量及其他高尖技术的出现,使传统大地测量受到了巨大冲击。因此经典大地测量学的定义已不适用,必须加以扩充。为此,20 世纪 70 年代间,费歇尔(I. Fisher)等人提出了所谓大地测量学问题,试图部分地扩充赫尔默特的定义;它可以综合地陈述为:大地测量学问题是把地球和其他天体的形状和外部重力场作为时间的函数来测定,并利用在地球表面上和在地球之外观测的参数来求定平均地球椭球。这一定义把地球和其他天体的形状和重力场看成是随时间变化的;大地测量的观测数据不只是在地球表面上取得,也可从地球的外部空间取得;大地测量除了测地之外,还可测其他天体的形状和重力场。同经典大地测量学定义

比较,有了很大程度的充实,但还不够充分。目前还没有一个权威性的大地测量学定义。

由于地球形状和外部重力场的测定是全球性的工作,大地测量很早就有了国际协作组织。1886年成立了国际大地测量学协会(IAG^①)。1919年又成立了国际大地测量学和地球物理学联合会(IUGG^②),IAG成为该联合会所属的7个协会之一。IAG和IUGG的学术活动一直延续至今,而且日益兴盛,凸显了大地测量学在地球科学中的重要地位。

1.2 萌芽阶段的大地测量

地球科学的发展是与人类社会的发展息息相关的。作为基础学的大地测量学也是如此,它是随着人类对地球认识的逐渐深化和人类社会的发展而形成和发展的。为了认识世界,人类首先想的是了解他们赖以生息和繁衍的地球的形状和大小。公元前6世纪后半叶,希腊学者毕达哥拉斯(Pythagoras)提出了地为球状的说法,称为地圆说。大约两个世纪之后,亚里士多德(Aristotle)用物理方法作了论证,支持这一学说。

为了测量地球大小,公元前3世纪亚历山大学者埃拉托斯特尼(Eratosthenes)首创子午圈弧度测量法,就是沿子午圈量取一段子午弧,并观测两端纬度差,来推算地球半径。他认为埃及的亚历山大城和赛尼城(今阿斯旺)位于同一子午圈上,适于用此法推算地球半径。但是,该两城的纬度差约 7° ;在当时的条件下,既无可靠的方法测量纬度,更无方法丈量长约800 km的距离。因此,只能由日影长推估两城的纬度差,由埃及地籍图估计两城距离。由此得出的地球半径相对于正确值的误差只是-2%。这一测算结

① International Association of Geodesy 的缩写词。

② International Union of Geodesy and Geophysics 的缩写词。

果的可贵之处,在于它第一次从几何学观点证实了地圆说。可是另一方面,对所得的半径值应当怀疑态度,原因是:第一,埃及地籍图不是实测的,是按商队骆驼步数计程来编制的;第二,两城不位于同一子午圈上,赛尼城位于亚历山大子午圈偏东 3° 处;第三,古埃及尺已失传,推算中所用的相应米数是后人考证的结果。

实地子午圈弧度测量,是公元8世纪20年代在中国中原大地上进行的。公元724年(唐朝开元十二年)在高僧一行(683—727,俗名张遂)的指导之下,在河南平原上选择了大致位于同一子午圈上的滑州白马(今滑县附近)、浚仪(今开封西北)、扶沟和上蔡等4地作为台站;用“复矩”仪测量北极高度,并用八尺高表测量冬至、夏至、春分和秋分日正午的日影长度,由这两种方法测量各台站的纬度,还用测绳丈量了其间的距离,如图1.1所示。

在中国中原大地上的这次子午圈弧度测量中,距离和纬度都是实际测量的,这在世界上属于首次。各台站的位置是精心选择的,它们接近于在同一子午圈上,只有几分的偏差。滑州至上蔡的

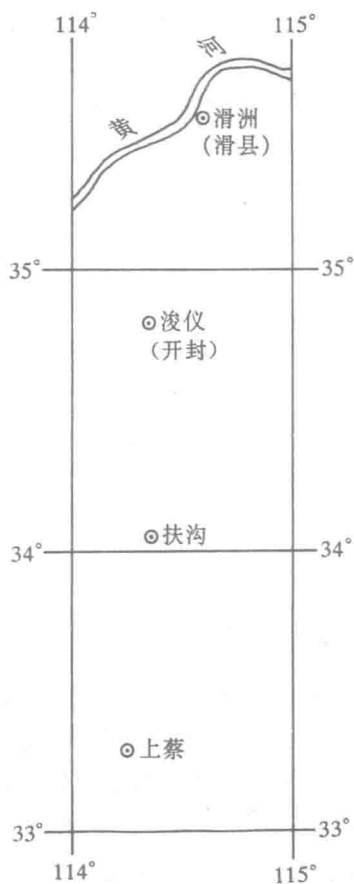


图 1.1 中国唐朝的子午圈弧度测量

距离将近 300 km,丈量这样长的距离,而且保持南北方向的准直,在当时的条件下诚难能可贵。此外,测区地势平坦,当时黄河在滑县以北通过,无大河阻隔,为获取可靠结果创造了条件。可惜当时使用的尺长迄未得到确认,无法验证这次弧度测量的结果(详见参考文献[1]3~5页)。

1615年荷兰的斯涅耳(W. Snell)创立了三角测量法。这一方法的出现,克服了地形引起的阻碍,从而结束了过去粗略估计或者直接在地面上丈量长达几百公里距离的历史,有力地促进了大地测量的发展。

1665—1666年牛顿提出了惊人的万有引力定律。为了定量地证实这一伟大的科学发现,要求知道地球的精确大小。1687年牛顿基于万有引力定律,又提出了地球是一个两极扁平的旋转椭球的说法,称为地扁说。

物理学的发展促进了大地测量学的发展。这时大地测量学科已初步形成,法国的皮卡(J. Picard)于1669—1670年第一次用三角测量方法进行了高精度弧度测量,得出了作为球状的地球大小,同正确值比较,误差只是0.01%,从几何学的观点定量地证实了牛顿引力定律。为了得到关于地球形状的正确答案,法国科学院于1735—1744年期间在秘鲁和北欧的拉普兰举行了弧度测量。将秘鲁、拉普兰和巴黎的弧度测量作了比较分析之后,又从几何学观点证实了地扁说。此后法国国民议会于1792年决定建立一个新的长度单位,与代表地球形状的椭球的子午圈弧长度发生关系,取其一象限的千万分之一作为长度标准,称为1米。这就是物理学中米制的由来。以上是大地测量学科初步形成时的成就。由此可以看出,大地测量学是一门古老学科,它在早期就为证实牛顿理论和建立计量标准中起到了不可磨灭的作用。

1.3 大地测量学科的形成

1.3.1 概述

空间大地测量的出现,使大地测量发生了巨大变革。为了便于叙述,把变革前的大地测量称为传统大地测量,变革后的大地测量称为现代大地测量。传统大地测量有两个分支学科:几何大地测量学和物理大地测量学,这将是第2和第3章的内容。现代大地测量学除了这两个分支学科之外,还出现了个新的分支学科:卫星大地测量学、动力大地测量学和海洋大地测量学,将是第5章至第7章的内容。

空间探测需要采用空间探测器和卫星,其中月球和行星的探测和研究采用大地测量方法,于是产生了月球和行星测量学。虽然它们的对象不是测地,但仍属于大地测量学的范畴。本书第4.4节将作扼要介绍。

几何大地测量学是大地测量学中成熟最早的一个分支学科。1615年三角测量法的出现,为几何大地测量学的发展提供了技术基础。从17世纪初到20世纪大量的大地测量工作,为人类社会的发展作出了巨大贡献。但自空间大地测量出现之后,它的大部分作用为现代大地测量方法所取代。因此,本书对几何大地测量学只作历史回顾,不及其详。

法国的克莱洛(A. C. Clairaut)于1743年论证了重力值与地球扁率之间的数学关系,奠定了物理大地测量学的基础,见第3.1节。这一分支学科是利用大量重力测量数据求定地球形状。1849年英国的斯托克斯(G. G. Stokes)提出了他的理论,通过重力异常的积分,逐点地给出大地水准面起伏,从理论上解决了由重力测量测定地球形状的问题,但实用上存在归算上的难题。1945年前苏联的莫洛坚斯基(М. С. Молоденский)提出了用地面重力测量数